

Подавление шума и выделение когерентных структур сигнала на основе алгоритма нелинейной адаптации

А. Р. Лисс¹✉, Б. С. Мандрикова²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, Россия

✉ alexander.liss@mail.ru

Аннотация. Предложен алгоритм подавления шума и выделения когерентных структур сложного сигнала. Алгоритм основан на совместном применении пакетных вейвлет-разложений и адаптивных стохастических порогов. Пороги оцениваются с заданной доверительной вероятностью на основе α -квантилей распределения Стьюдента. Описаны операции алгоритма и предложена схема его реализации. На примере данных нейтронных мониторов (регистрируют интенсивность вторичных космических лучей, www.nmdb.eu) показана эффективность алгоритма.

Ключевые слова: нестационарные сигналы сложной структуры, аномалии, вейвлет-преобразование, нейтронные мониторы

Для цитирования: Лисс А. Р., Мандрикова Б. С. Подавление шума и выделение когерентных структур сигнала на основе алгоритма нелинейной адаптации // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 10. С. 58–66. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-58-66.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Noise Suppression and Detection of Coherent Signal Structures Based on the Nonlinear Adaptation Algorithm

A. R. Liss¹✉, B. S. Mandrikova²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation
FEB RAS, Paratunka, Kamchatskiy Kray, Russia

✉ alexander.liss@mail.ru

Abstract. An algorithm for noise suppression and extraction of coherent structures of a complex signal is proposed. The algorithm is based on the joint application of packet wavelet decompositions and adaptive stochastic thresholds. Thresholds are estimated with a given confidence level based on the α -quantiles of Student's distribution. The operations of the algorithm are described and a scheme for its implementation is proposed. On the example of data from neutron monitors (recording the intensity of secondary cosmic rays, www.nmdb.eu), the efficiency of the algorithm is shown. The selected coherent structures characterize the occurrence of anomalies in variations in the intensity of cosmic rays. Anomalies in cosmic ray data create a radiation hazard, disrupt radio communications, and cause satellites to malfunction, leading to disorientation and destruction. Therefore, the task of timely diagnosis of such events is relevant. The application of the algorithm made it possible to clearly detect and evaluate the moments of occurrence of anomalies in cosmic rays, which were observed during periods of magnetospheric disturbances.

Keywords non-stationary signals of complex structure, anomalies, wavelet transform, neutron monitors

For citation: Liss A. R., Mandrikova B. S. Noise Suppression and Detection of Coherent Signal Structures Based on the Nonlinear Adaptation Algorithm // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 10. P. 58–66. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-58-66.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Сложность и объем данных, требующих обработки и анализа, стремительно возрастают, и использование классических методов и подходов не дает успешных результатов [1], [2]. Особую сложность представляет обработка и анализ регистрируемых природных данных. Проблема заключается в сложной структуре данных, отсутствии априорных знаний об информативной составляющей и высоком уровне шума.

Предлагается алгоритм подавления шума и выделения когерентных структур сложного сигнала, включающий совместное применение пакетных вейвлет-разложений и адаптивных стохастических пороговых функций. Оценка значений порога выполняется с заданной доверительной вероятностью на основе α -квантилей распределения Стьюдента. Построение деревьев вейвлет-пакетов и применение порогов позволяют подавить шум в сложном сигнале и детектировать его структурные компоненты, включая локальные особенности разной формы и продолжительности. Для визуализации и получения оценки мощности выделенных локальных структур, предложено применение дискретного вейвлет-преобразования.

В статье рассматриваются данные нейтронных мониторов [3], регистрируемые сетью наземных датчиков и представляющие собой вторичные космические лучи. Аномалии в космических лучах (КЛ) способны оказывать негативное воздействие почти на все технические объекты и здоровье людей [4], поэтому задача своевременной диагностики таких событий актуальна и решается большим числом ученых и научных групп [5]–[8]. Трудность решения задачи обработки и анализа данных космических лучей обусловлена их сложной, нелинейной структурой, высоким уровнем шума и отсутствием полных знаний об исследуемых процессах. Применение классических методов (усредняющих [2], пороговых [9]) анализа временных рядов не позволяет эффективно решать задачу обработки таких данных и не обеспечивает своевременное обнаружение аномалий. Существенный недостаток этих методов – риск искажения информации и, как следствие, либо возникновение «ложного» сигнала тревоги, либо потеря аномалии. Существующие в настоящее время физические методы результативны не для всех видов аномалий в данных КЛ, а

также не автоматизируемы, что не позволяет применять их в оперативном анализе при мониторинге космической погоды [6]. Например, в [10] с помощью метода главных компонент предпринята попытка исследования совокупного влияния уровня солнечной активности и наклона нейтральной поверхности межпланетного магнитного поля на модуляцию галактических космических лучей в гелиосфере. Авторами [10] получен результат, подтверждающий существующие теоретические представления о дрейфовом движении космических лучей в гелиосфере, однако ввиду сложности сигнала КЛ, полученный результат не был согласован с существующей теорией. В публикации показано, что применение алгоритма позволило четко детектировать и оценить моменты возникновения локальных аномальных особенностей в космических лучах, которые наблюдались в периоды магнитосферных возмущений.

Методы. Выполняем разложение сигнала $f \in H$ (H – пространство Гильберта) по адаптивному базису $B = \{\mathbf{g}_m\}_{m \in N}$ (N – натуральные числа, включая 0):

$$f_I = \sum_{m \in I} \langle f, \mathbf{g}_m \rangle \mathbf{g}_m, \quad (1)$$

где I – множество индексов.

Минимизируя погрешность $\varepsilon[I] = \|f - f_I\|^2 = \sum_{m \notin I} |\langle f, \mathbf{g}_m \rangle|^2$, определяем множество I так, чтобы векторы \mathbf{g}_m с индексами из I имели наибольшие амплитуды коэффициентов $|\langle f, \mathbf{g}_m \rangle|$.

Тогда для (1) справедливо

$$f_I = \sum_{m \in I} T(\langle f, \mathbf{g}_m \rangle) \mathbf{g}_m, \quad (2)$$

где пороговая функция $T(x) = \begin{cases} x, & \text{если } |x| \geq T, \\ 0, & \text{если } |x| < T. \end{cases}$

Для сигнала с шумом

$$X[n] = f[n] + V[n], \quad (3)$$

где $f[n]$ – полезный сигнал; $V[n]$ – шум.

Из (2) получаем:

$$\tilde{F} = DX = \sum_{m \in N} T(\langle X, \mathbf{g}_m \rangle) \mathbf{g}_m. \quad (4)$$

Риск оценки \tilde{F}

$$r(D, f) = E \left\{ \left\| \tilde{F} - f \right\|^2 \right\}, \quad (5)$$

где E – математическое ожидание.

Для минимизации риска $r(D, f)$ порог T в (2) должен быть определен так, чтобы он с большой вероятностью превышал максимальный уровень коэффициентов шума $|V_B[n]|$, $V_B[n] = \langle V, \mathbf{g}_m \rangle$ (см. (3)) [11].

В случае базисов вейвлет-пакетов [12], [13] $B_j^P = \left\{ \Psi_j^P(2^j t - m) \right\}_{m \in N}$, где B_j^P – базис пространства W_j^P , t – время. Выполняя оценку (4), получаем разложение по дереву вейвлет-пакетов:

$$W_j^P = W_{j+1}^{2P} \oplus W_{j+1}^{2P+1}. \quad (6)$$

В узлах дерева с разрешением j применяем порог T_j .

Алгоритм нелинейной адаптации:

1. Выполняем разложение сигнала X в вейвлет-пакеты (см. (6)):

$$W_j^0 : W_j^0 = \bigoplus_{i=0}^I W_{j_i}^{P_i},$$

$\left\{ \Psi_{j_i}^{P_i}(2^{j_i} t - m) \right\}_{m \in N}$ есть базис пространства $W_{j_i}^{P_i}$.

2. Базис $B_{j_i}^{P_i}$ пространства $W_{j_i}^{P_i}$

$$B_{j_i}^{P_i} = \begin{cases} \left\{ \Psi_{j_i}^{P_i}(2^{j_i} t - m) \right\}_{m \in N}, \\ \text{если } \sum_{m \in I^{P_i}} \left| \left\langle X, \Psi_{j_i, m}^{P_i} \right\rangle \right|^2 \geq \\ \geq \sum_{m \in I^{2P_i}} \left| \left\langle X, \Psi_{j_i+1, m}^{2P_i} \right\rangle \right|^2 + \\ + \sum_{m \in I^{2P_i+1}} \left| \left\langle X, \Psi_{j_i+1, m}^{2P_i+1} \right\rangle \right|^2; \\ \left\{ \Psi_{j_i+1}^{2P_i} \right\}_{m \in N} \cup \left\{ \Psi_{j_i+1}^{2P_i+1} \right\}_{m \in N}, \\ \text{если } \sum_{m \in I^{P_i}} \left| \left\langle X, \Psi_{j_i, m}^{P_i} \right\rangle \right|^2 < \\ < \sum_{m \in I^{2P_i}} \left| \left\langle X, \Psi_{j_i+1, m}^{2P_i} \right\rangle \right|^2 + \\ + \sum_{m \in I^{2P_i+1}} \left| \left\langle X, \Psi_{j_i+1, m}^{2P_i+1} \right\rangle \right|^2, \end{cases} \quad (7)$$

где множество индексов I^l , $l = P_i, 2P_i, 2P_i+1$, $m \in I^l$, если $\left| \left\langle X, \Psi_{j_i, m}^l \right\rangle \right| \geq T_{j_i}^P$.

Очевидно, что для минимизации риска r (см. (5)) порог $T_{j_i}^P$ с большой вероятностью должен быть больше максимального уровня коэффициентов шума. Как доказано в [14], вне окрестностей, содержащих локальные особенности сигнала, абсолютные значения коэффициентов $\left| \left\langle X, \Psi_{j_i, m}^{P_i} \right\rangle \right|$ по аргументу m близки к нулю. Так как локальные особенности в сигнале наблюдаются в периоды аномалий и редки, на основе правила трех сигм [15] с высокой вероятностью ($\alpha \approx 0.99$) можно утверждать, что значения $\left| \left\langle X, \Psi_{j_i, m}^{P_i} \right\rangle \right|$ по аргументу m , находящиеся в интервале $(\mu_{j_i} - 3\sigma_{j_i}; \mu_{j_i} + 3\sigma_{j_i})$, где $\mu_{j_i} \approx 0$ – математическое ожидание величины $\left| \left\langle X, \Psi_{j_i, m}^{P_i} \right\rangle \right|$, σ_{j_i} – стандартное отклонение $\left| \left\langle X, \Psi_{j_i, m}^{P_i} \right\rangle \right|$.

Тогда в случае нормального распределения величины $\left| \left\langle X, \Psi_{j_i, m}^{P_i} \right\rangle \right|$ мы можем для каждого уровня разложения j_i с заданной доверительной вероятностью α оценить пороги $T_{j_i}^P$ как $T_{j_i}^P = t_{1-\frac{\alpha}{2}, N-1} \hat{\sigma}_{j_i}$, где $t_{\alpha, N}$ – α -квантили распределения Стьюдента [15], $\hat{\sigma}_{j_i}$ – выборочное стандартное отклонение величины $\left| \left\langle X, \Psi_{j_i, m}^{P_i} \right\rangle \right|$, которое оценивается в периоды отсутствия аномалий в данных.

Отметим, что в случае существенной нестационарности данных статистические характеристики данных для определения порогов $T_{j_i}^P$ могут быть оценены в пределах скользящего временного окна.

3. На основе операций 1, 2 получаем представление сигнала

$$\tilde{F}_{B_{j_i}^{P_i}} = D_{B_{j_i}^{P_i}} X = \sum_{j_i} \sum_m T_{j_i}^P \left(\left\langle X, \Psi_{j_i, m}^{P_i} \right\rangle \right) \Psi_{j_i, m}^{P_i}, \quad (8)$$

где $B_{j_i}^{P_i} = \left\{ \Psi_{j_i}^{P_i}(2^{j_i} t - m) \right\}_{m \in N}$ – базисы вейвлет-пакетов, узлы дерева вейвлет-пакетов (j_i, P_i) .

4. Используя дискретное вейвлет-преобразование, для $\tilde{F}_{B_{j_i}^{p_i}}$ (см. (8)) получаем

$$W\tilde{F}_{B_{j_i}^{p_i}} = \sum_{s,k=-\infty}^{\infty} c_{sk} \Psi_{sk},$$

где

$$\Psi_{sk} = 2^{s/2} \Psi(2^s n - k), s, k \in N, c_{sk} = \langle \tilde{F}_{B_{j_i}^{p_i}}, \Psi_{sk}^* \rangle = W\tilde{F}_{B_{j_i}^{p_i}} \left(\frac{1}{2^s}, \frac{k}{2^s} \right)$$

– коэффициенты разложения функции в вейвлет-ряд.

5. Для выделенных аномалий их мощность в момент времени $t = u$ может быть оценена как [16]

$$E_k = \sum_s W\tilde{F}_{B_{j_i}^{p_i}} \left(\frac{1}{2^s}, \frac{k}{2^s} \right)$$

и будет положительной в случае аномального возрастания значений функции (положительная аномалия) или отрицательной в случае аномального убывания значений функции (отрицательная аномалия).

Конец алгоритма.

Схема реализации алгоритма. На рис. 1 представлена детальная схема реализации предлагаемого алгоритма. Сначала выполняется разложение регистрируемых данных нейтронного монитора в вейвлет-пакеты, далее применяются адаптивные пороги и по амплитуде оценивается мощность выделенных аномалий.

Результаты применения алгоритма. На рис. 2 представлены результаты применения алгоритма к данным нейтронных мониторов [3]. Для сравнения, на рис. 2, в, г также показаны результаты использования непрерывного вейвлет-

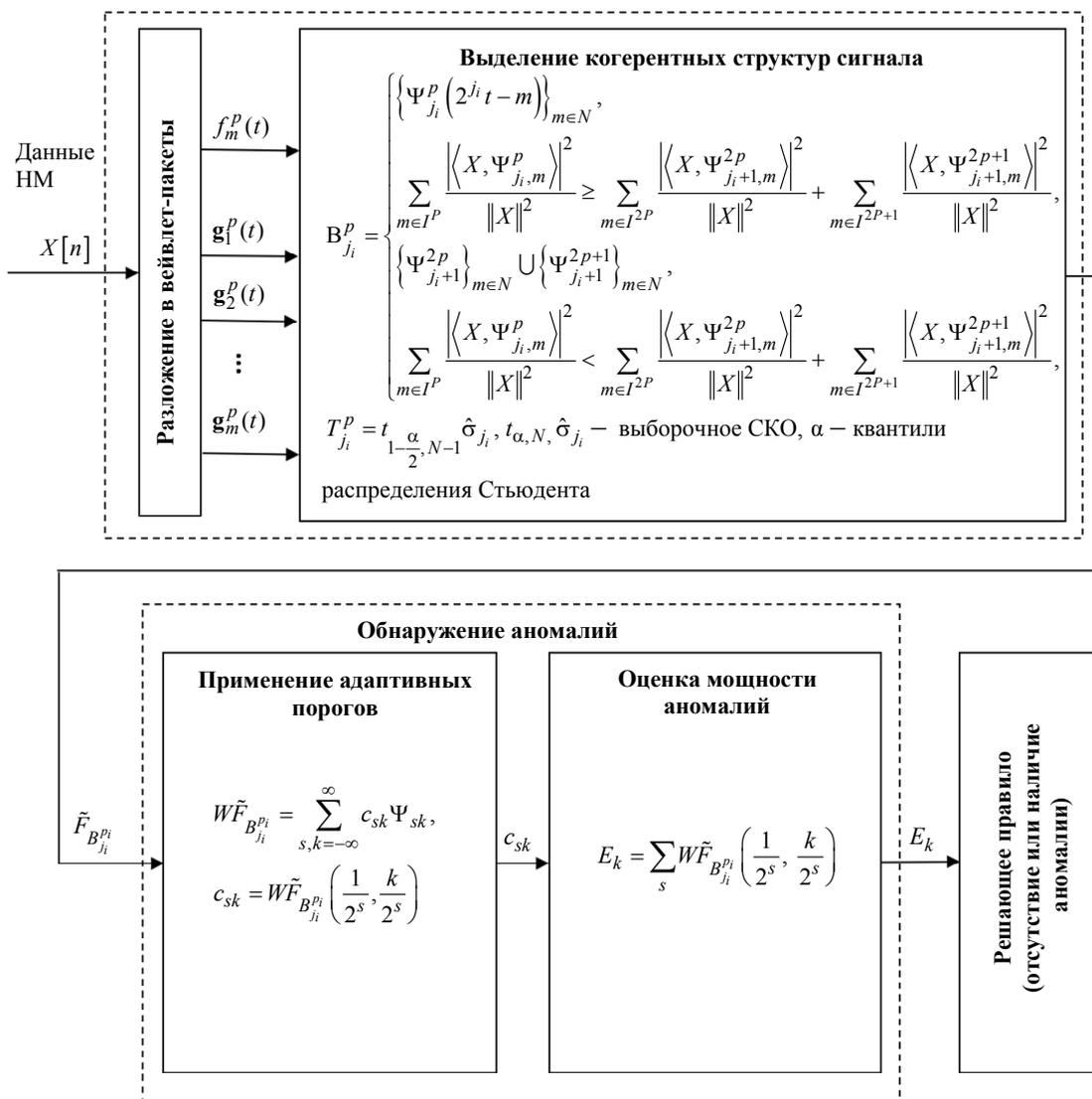
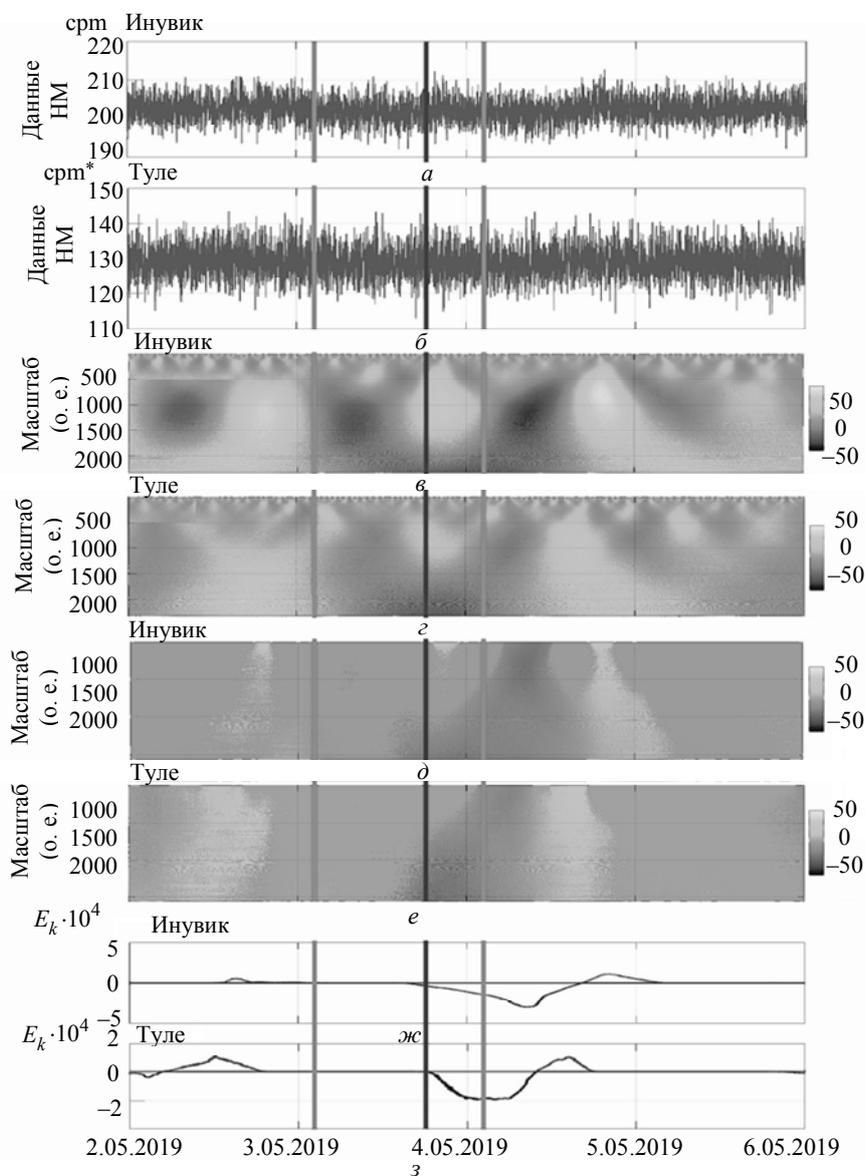


Рис. 1. Схема реализации алгоритма
Fig. 1. Scheme of the implementation of the algorithm

преобразования (НВП). На рис. 2, а, б показаны исходные данные нейтронных мониторов станций Инувик и Туле [3]. В анализируемый период в данных нейтронных мониторов зарегистрирована аномалия (эффект Форбуша) в 18:00 UT 3 мая 2019 г. [16]. На рис. 2 момент возникновения аномалии отмечен черной вертикальной линией. Моменты регистрации геомагнитных бурь в данный период отмечены серыми вертикальными линиями [17]. По данным обработки (рис. 2, д–з) в конце дня 3 мая, в момент эффекта Форбуша, на станциях Инувик и Туле произошло anomальное снижение интенсивности КЛ. Снижение более выражено на ст. Туле (превышало фоновый уровень за 4...6 ч до начала геомагнитной бури).

Сравнение результатов НВП (рис. 2, в, г) с результатами предложенного алгоритма (рис. 2, д–з) показывает его более высокую эффективность. Результаты НВП согласуются с результатами алгоритма. Однако из-за влияния шумовых факторов (связаны с суточным ходом вариаций КЛ, наблюдаемым в спектре НВП), выявить аномалии КЛ по результатам НВП затруднительно. При этом преимущество предлагаемого алгоритма также заключается в возможности получения точной количественной меры изменчивости КЛ (рис. 2, ж, з). Отметим, что несмотря на различия в данных нейтронных мониторов разных станций, результаты обработки показывают наличие ярко выраженного общего характера в динамике



* срт – число частиц в минуту
Рис. 2. Результаты обработки данных нейтронных мониторов (2.05.2019–6.05.2019)
Fig. 2. Results of neutron monitor data processing (2.05.2019–6.05.2019)

КЛ как до, так и во время события. Результат показывает высокую чувствительность алгоритма и возможность детектирования скрытых в шуме сложных структур.

На рис. 3 показаны результаты применения алгоритма к данным нейтронных мониторов за период с 9 по 18 окт. 2022 г. В верхней части рис. 3 для анализа состояния околоземного космического пространства приведены данные скорости солнечного ветра (ССВ) (рис. 3, а), значения Vz-компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) (рис. 3, б), и представлены данные индекса геомагнитной активности Dst (рис. 3, в). На рис. 3, г серым цветом показаны исходные регистрируемые данные нейтронного монитора станции Оулу, черным – результат применения к данным операции (7). В анализируемый период 10 окт. в 13:00 UTC в данных нейтронных мониторов зарегистрирована аномалия (постепенное начало слабой геомагнитной бури [18]). На рис. 3 момент возникновения аномалии отмечен вертикальной линией. По данным космической погоды [18] колебания ММП усиливались до $V_z = \pm 10$ нТл

(рис. 3, б), а ССВ увеличивались до 390 км/с (рис. 3, а). Результаты обработки (рис. 3, д, е) показывают аномальное снижение интенсивности КЛ за 8...10 ч до начала геомагнитной бури и аномальное повышение в момент регистрации бури.

Далее 12 окт. в 03:00 UTC по данным [18] произошла слабая геомагнитная буря (момент начала бури отмечен вертикальной линией). Флуктуации ММП увеличились до $V_z = \pm 12$ нТл (рис. 3, б), ССВ возросла до 490 км/с [18]. Результаты обработки (рис. 3, д, е) показывают снижение интенсивности КЛ (эффект Форбуша), которое достигло максимальной интенсивности в момент резкого увеличения амплитуды колебаний Vz-компоненты ММП (рис. 3, б).

В начале дня 16 окт. флуктуации ММП усилились до $V_z = \pm 12$ нТл (рис. 3, б). По данным обработки в этот период произошло кратковременное аномальное увеличение КЛ (рис. 3, д, е). Алгоритм позволил обнаружить аномалию (аномальное повышение интенсивности) за несколько часов до начала геомагнитной бури, зарегистрированной 17 окт. в 10:00 UTC [18]. Наибольшей ин-

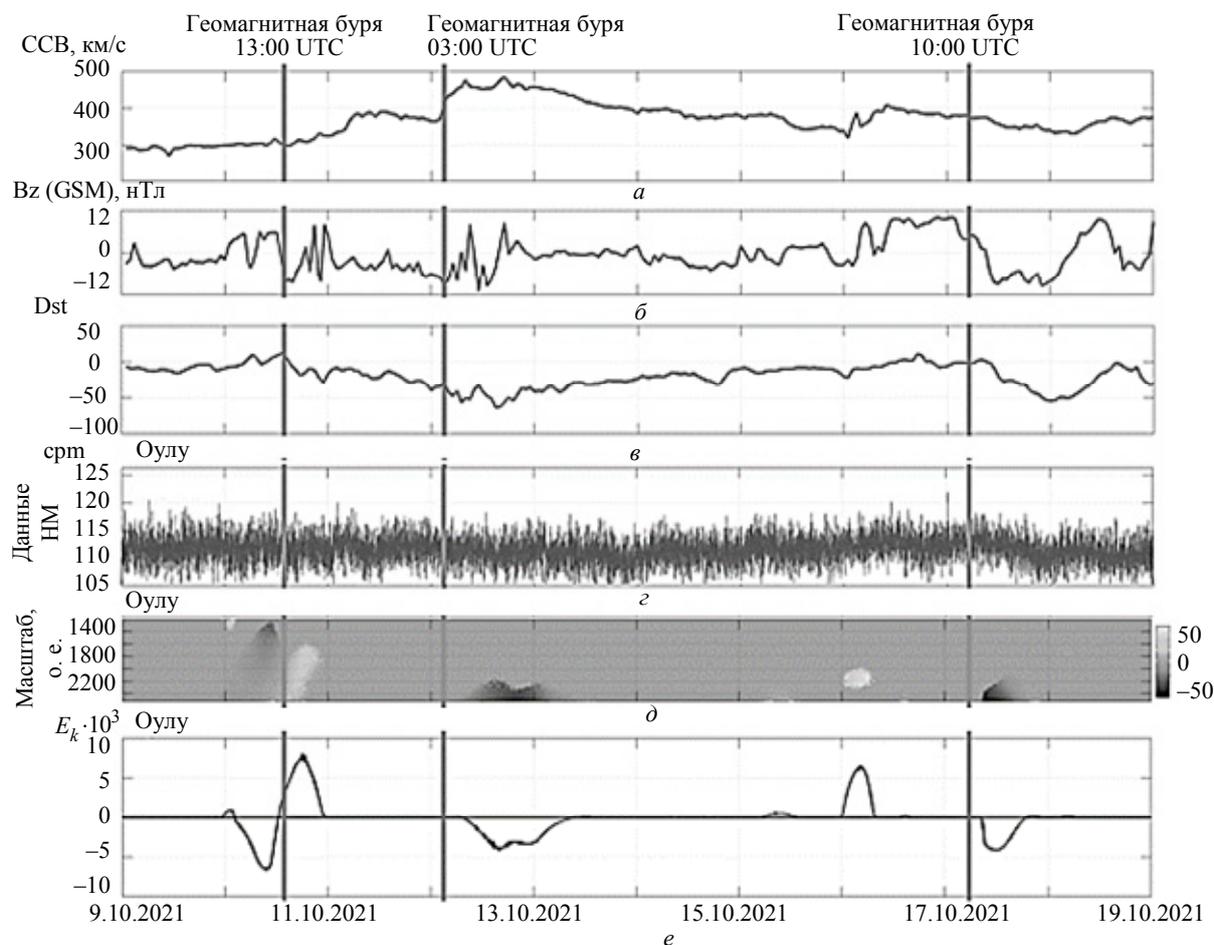


Рис. 3. Результаты обработки данных НМ (9.05.2019-18.05.2019)

Fig. 3. NM data processing results (9.05.2019-18.05.2019)

тенсивности она достигала в моменты увеличения амплитуды колебаний Vz-компоненты (рис. 3, б) и колебаний ССВ (рис. 3, а). В момент регистрации геомагнитной бури по результатам алгоритма наблюдается аномальное понижение интенсивности КЛ (рис. 3, д, е). Представленные результаты подтверждают высокую чувствительность алгоритма, а также возможность точного определения моментов начала и окончания аномальных особенностей в сигнале.

Оценка эффективности предложенного алгоритма
Evaluation of the effectiveness of the proposed algorithm

Период	Количество ЭФ/ количество ложных ЭФ (без ГБ)	Результаты алгоритма
2013–2015 (высокая СА)	285/32	Обнаружено: 86 %
		Не обнаружено: 14 %
		Ложная тревога 1 (без ЭФ): 13 %
		Ложная тревога 2 (без ГБ): 9 %
2019–2020 (низкая СА)	174/22	Обнаружено: 88 %
		Не обнаружено: 12 %
		Ложная тревога 1 (без ЭФ): 11 %
		Ложная тревога 2 (без ГБ): 9 %

Результаты оценки эффективности предложенного алгоритма представлены в таблице. Из таблицы видно, что обнаружение аномалий (эффектов Форбуша, ЭФ) при высокой солнечной активности (СА) составляет ~86 %, при низкой солнечной ак-

тивности ~88 %. Частота ложных срабатываний при высокой СА составляет ~13 % (ложная тревога 1 в таблице), при низкой солнечной активности ~11 %. Частота обнаружения аномалий в КЛ, не связанных с геомагнитной бурей (ложная тревога 2 в таблице), составляет ~9 %. Результаты подтверждают эффективность алгоритма.

Заключение. Результаты исследования показали эффективность предложенного алгоритма для анализа сложных нестационарных сигналов и обнаружения аномалий разной формы и продолжительности. Результаты алгоритма, в сравнении с результатами непрерывного вейвлет-преобразования, показали его более высокую чувствительность и способность детектировать скрытые в шуме сложные структуры. Возможность численной реализации алгоритма позволяет его применять в оперативной обработке данных нейтронных мониторов в задачах космической погоды.

Благодарности. Авторы выражают благодарность организациям, выполняющим поддержку баз данных нейтронных мониторов (www.nmdb.eu, <http://spaceweather.izmiran.ru>), используемых в исследованиях.

Работа выполнена в рамках ГЗ по теме «Физические процессы в системе ближнего космоса и геосфер при солнечных и литосферных воздействиях» (2021–2023 гг.), регистрационный номер АААА-А21-121011290003-0.

Список литературы

1. Livada M., Mavromichalaki H., Plainaki C. Galactic cosmic ray spectral index: the case of Forbush decreases of March 2012 // *Astrophys. Space Sci.* 2018. Vol. 363, no. 8. doi: 10.1007/s10509-017-3230-9.
2. Ni S. L., Gu B., Han Z. Interplanetary coronal mass ejection induced Forbush decrease event: a simulation study with one-dimensional stochastic differential method // *Acta Physica Sinica (Chinese Edition)*. 2017. Vol. 66, no. 13. P.1–8.
3. База данных сети нейтронных мониторов. URL: www.nmdb.eu (дата обращения 11.10.2022).
4. Кузнецов В. Д. Космическая погода и риски космической деятельности // *Космическая техника и технологии*. 2014. № 3 (6). С. 3–13.
5. Мандрикова О. В., Залаяев Т. Л. Моделирование вариаций космических лучей на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений и нейронных сетей переменной структуры // *Цифровая обработка сигналов*. 2015. № 1. С. 11–16.
6. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом / А. А. Абунина, М. А. Абунина, А. В. Белов, Е. А. Ерошенко, В. А. Оленева, В. Г. Янке // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012. Т. 52, № 3. С. 313–320.
7. Forbush decreases and geomagnetic storms during a highly disturbed solar and interplanetary period / B. Badruddin, O. P. M. Aslam, M. Derouich, H. Asiri, K. Kudela // *Space Weather*. 2019. Vol. 17, no. 487. P. 14–28.
8. Mandrikova O. V., Solovov I. S., Zalyaev T. L. Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data // *Earth Planet Space*. 2014. Vol. 66, no. 148. URL: <http://www.earth-planets-space.com/content/66/1/148/> (дата обращения 11.10.2022).
9. Using the real-time Neutron Monitor Database to establish an Alert signal / H. Mavromichalaki, G. Souvatzoglou, Ch. Sarlanis, A. Papaioannou, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke // *Proc. 31st Int. Cosmic Ray Conf., University ŁÓDŹ, Poland, 2009*. P. 1–4.
10. Исследование методом главных компонент влияния геометрии нейтрального токового слоя геосферы и солнечной активности на модуляцию галактических космических лучей / П. Ю. Гололобов, П. А. Кривошапкин, Г. Ф. Крымский, С. К. Герасимова // *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 1. С. 30–35.

11. Геппенер В. В., Мандрикова Б. С. Обнаружение и идентификация аномальных эффектов в сложном сигнале // Автоматика и телемеханика. 2021. № 10. С. 46–59.

12. Mallat S. G., Zhang Z. F. Matching pursuits with time-frequency dictionaries // IEEE Trans. Signal Process. 1993. Vol. 41. P. 3397–3415.

13. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. М.: РХД, 2001. 460 с.

14. Mallat S. G. A Wavelet tour of signal processing. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1999.

15. Witte R. S., Witte J. S. Statistics. 11th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2017. P. 496.

16. Mandrikova O., Mandrikova B. Hybrid method for detecting anomalies in cosmic ray variations using neural networks autoencoder // Symmetry. 2022. Vol. 14, no. 744. doi: 10.3390/sym14040744.

17. Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН. URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/> (дата обращения 11.10.2022).

18. Forecast of space weather according to the data of Federov IAG. URL: <http://ipg.geospace.ru> (дата обращения 01.10.2022).

Информация об авторах

Лисс Александр Рудольфович – д-р техн. наук, профессор СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: alexander.liss@mail.ru

Мандрикова Богдана Сергеевна – мл. научн. сотрудник Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, ул. Мирная, д. 7, с. Паратунка, Камчатский край, 684034, Россия.

E-mail: 555bs5@mail.ru

References

1. Livada M., Mavromichalaki H., Plainaki C. Galactic cosmic ray spectral index: the case of Forbush decreases of March 2012 // Astrophys. Space Sci. 2018. Vol. 363, no. 8. doi: 10.1007/s10509-017-3230-9.

2. Ni S. L., Gu B., Han Z. Interplanetary coronal mass ejection induced Forbush decrease event: a simulation study with one-dimensional stochastic differential method // Acta Physica Sinica (Chinese Edition). 2017. Vol. 66, no. 13. P.1–8.

3. Baza danyh seti nejtronnyh monitorov. URL: www.nmdb.eu (data obrashhenija 11.10.2022).

4. Kuznecov V. D. Kosmicheskaja pogoda i riski kosmicheskoy dejatel'nosti // Kosmicheskaja tehnika i tehnologii. 2014. № 3 (6). S. 3–13. (In Russ.).

5. Mandrikova O. V., Zaljaev T. L. Modelirovanie variacij kosmicheskikh luchej na osnove sovmeshhenija kratnomasshtabnyh vejvlet-razlozhenij i nejronnyh setej peremennoj struktury // Cifrovaja obrabotka signalov. 2015. № 1. S. 11–16. (In Russ.).

6. Forbush-jeffekty s vnezapnym i poste ennym nachalom / Abunin A. A., Abunina M. A., Belov A. V., Eroshenko E. A., Oleneva V. A., Janke V. G. // Geomagnetizm i aje-ronomija. 2012. T. 52, № 3. S. 313–320. (In Russ.).

7. Badruddin B., Aslam O. P. M., Derouich M., Asiri H., Kudela K. Forbush decreases and geomagnetic storms during a highly disturbed solar and interplanetary period // Space Weather. 2019. Vol. 17, no. 487. P. 14–28.

8. Mandrikova O. V., Solovev I. S., Zalyaev T. L. Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data // Earth Planet Space. 2014. Vol. 66, no. 148. URL: <http://www.earth-planets-space.com/content/66/1/148/> (data obrashchenia: 11.10.22).

9. Using the real-time Neutron Monitor Database to establish an Alert signal / H. Mavromichalaki, G. Sou-

vatzoglou, Ch. Sarlanis, A. Papaioannou, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke // Proc. 31st Int. Cosmic Ray Conf., University ŁÓDZ, Poland, 2009. P. 1–4.

10. Issledovanie metodom glavnyh komponent vlijanija geometrii nejtral'nogo tokovogo sloja geliosfery i solnechnoj aktivnosti na moduljaciju galakticheskikh kosmicheskikh luchej / P. Ju. Gololobov, P. A. Krivoschapkin, G. F. Krymskij, Gerasimova S. K. // Solnechno-zemnaja fizika. 2020. T. 6, № 1. S. 30–35. (In Russ.).

11. Геппенер В. В., Мандрикова Б. С. Обнаружение и идентификация аномальных эффектов в сложном сигнале // Автоматика и телемеханика. 2021. № 10. С. 46–59. (In Russ.).

12. Mallat S. G., Zhang Z. F. Matching pursuits with time-frequency dictionaries // IEEE Trans. Signal Process. 1993. Vol. 41. P. 3397–3415.

13. Dobeshi I. Desjat' lekcij po vejvletam. M.: RHD, 2001. 460 с.

14. Mallat S. G. A Wavelet tour of signal processing. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1999.

15. Witte R. S., Witte J. S. Statistics. 11th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2017. P. 496.

16. Mandrikova O., Mandrikova B. Hybrid method for detecting anomalies in cosmic ray variations using neural networks autoencoder // Symmetry. 2022. Vol. 14, no. 744. doi: 10.3390/sym14040744.

17. Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН. URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/> (data obrashchenia 11.10.2022).

18. Forecast of space weather according to the data of Federov IAG. URL: <http://ipg.geospace.ru> (data obrashchenia 01.10.2022).

Information about the authors

Alexander R. Liss – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: alexander.liss@mail.ru

Bogdana S. Mandrikova – junior research assistant of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Kamchatskiy Kray, Russia.
E-mail: 555bs5@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.10.2022; принята к публикации после рецензирования 07.11.2022; опубликована онлайн 25.12.2022.

Submitted 28.10.2022; accepted 07.11.2022; published online 25.12.2022.
